

基于 HSS 模型的深基坑开挖对邻近桥桩的影响分析及变形控制研究

周赫宸^{1,2}, 秦朝辉³, 顾晓强^{1,2*}

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 山东祥瑞路桥工程有限公司, 山东 德州 251100)

摘要: 基坑开挖引起的变形会对周围建(构)筑物造成不利的影... 在前人研究基础上, 确定了济南地区黄河冲积地层小应变硬化土模型(HSS模型)参数的取值方法。以济南黄河大桥改扩建工程项目为背景, 基于HSS模型, 通过三维数值模拟, 分析了新建大桥桥墩深基坑开挖对邻近既有桥梁桩基础的影响, 并对支撑预应力和隔离桩的变形控制作用进行参数分析。计算结果表明, 对土体采用HSS模型以及合理的参数取值能够有效模拟基坑开挖引起的变形。变形控制措施研究表明, 角撑施加预应力对邻近桥桩变形影响不大, 但会造成基坑围护结构顶部反向变形的不利后果。隔离桩对邻近桥桩同时存在阻隔作用和牵引作用, 设计时应避免牵引作用的不利影响, 隔离桩的最优方案为宽7.2 m, 桩长25 m。

关键词: 基坑开挖; HSS模型; 邻近桥桩; 预应力支撑; 隔离桩

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)05-0369-07

Analysis of the influence of excavation on adjacent bridge piles and deformation control using HSS model

ZHOU He-chen^{1,2}, QIN Zhao-hui³, GU Xiao-qiang^{1,2*}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Shandong Xiangrui Road and Bridge Co., Ltd., Dezhou 251100, Shandong, China)

Abstract: Excavation of foundation pits will induce deformation and adverse environmental impacts on nearby structures. Based on previous works, a method was proposed in this work to determine the parameters of Hardening Soil model with small strain (HSS) for Yellow River alluvial strata in Jinan city. Taking the expansion project of Jinan Yellow River Bridge as an excavation case, a three-dimensional numerical analysis model was established. The HSS model was used for modelling the soil to analyze the influence of excavation of a new constructed bridge pier foundation pit on the adjacent existing bridge pile foundation. Meanwhile, the deformation control effect of the prestressed strut and isolation pile was analyzed. The calculation results show that the deformation caused by the excavation can be effectively simulated by using the HSS model with reasonable parameter values for the soil. The study of deformation control measures shows that the prestressing of the corner struts has little effect on the deformation of the adjacent bridge piles, but will cause the reverse deformation on the top of the retaining wall of the foundation pit. Isolation piles have both blocking and traction effects on bridge piles, and the adverse effects of traction should be avoided in the design. The optimal solution for isolation piles is 7.2 m in width and 25 m in length.

Key words: excavation; HSS model; adjacent bridge piles; prestressed strut; isolation piles

收稿日期: 2022-09-13

基金项目: 国家自然科学基金(52178344)。

作者简介: 周赫宸(2000—), 男, 江西广丰人, 硕士研究生, 主要从事岩土工程基坑变形分析方面的研究工作。E-mail: 2132340@tongji.edu.cn。

*通信作者: 顾晓强(1981—), 男, 浙江桐乡人, 博士, 教授, 主要从事土的基本特性、土动力学和宏微观土力学等方面的研究。

E-mail: guxiaoqiang@tongji.edu.cn。

0 引言

基坑开挖势必会引起围护结构的变形及墙后土体变形,若变形过大会导致周边结构开裂和破坏,影响周边建(构)筑物的正常使用^[1]。POULOS等^[2]运用平面有限元和边界元耦合方法,研究基坑开挖对邻近单桩的影响。张子新等^[3]对土体采用修正剑桥模型,王恒等^[4]采用HS本构模型,分析了基坑开挖对周围环境的影响。已有研究表明HSS模型对基坑开挖引起的变形有较好的预测作用^[5-6],但是其模型参数无法从勘察报告中直接获取,需要通过较为复杂的试验(三轴固结排水加卸载试验和弯曲元波速试验等)方能确定,参数的确定存在较大的挑战。另外,对于周边有变形严格控制的建(构)筑物时,通常采用支撑施加预应力和隔离桩进行变形主动控制。应宏伟等^[7]研究表明,隔断墙可明显减小小围护墙水平位移。郑刚等^[8]指出隔离桩在控制坑外土体、隧道水平位移时同时存在阻隔作用和牵引作用,并对隔离桩布置位置、桩长进行参数分析,但未能考虑隔离桩宽度的影响。李忠超等^[9]分析了不同隔离桩桩长对邻近隧道变形的控制效果。

以往研究大多集中于隔离桩对基坑或邻近隧道变形的控制效果,隔离桩对邻近桥桩的影响有待进一步研究。本文对土体采用HSS模型,结合已有的研究确定了济南地区黄河冲积地层HSS模型参数取值方法。将该套方法应用到济南黄河大桥基坑工程中,分析了基坑开挖对紧邻既有桥桩的影响,并讨论了支撑预应力、隔离桩宽度、隔离桩深度等因素的作用。

1 工程概况

G104京岚线济南黄河公路大桥改扩建工程位于济南黄河冲积平原,本文对其中开挖深度较深、周围环境相对复杂的某桥墩基坑进行分析。基坑长40.2 m,宽34.6 m,开挖深度为10.89 m,围护结构采用拉森钢板桩,桩长18 m,每延米截面面积 $A=236\text{ cm}^2$,每延米惯性矩 $I=39\,600\text{ cm}^4$,每延米抗弯截面系数 $W=2\,200\text{ cm}^3$,钢板桩模量 $E_{\text{steel}}=215\text{ GPa}$ 。地下水位于地表以下4.7 m,基坑开挖过程中需考虑基坑降水的作用。

基坑西侧紧邻现有老黄河大桥桥墩,其基础形式为桩基础,桩径1.2 m,距基坑坡顶线最近约2.5 m。为减小基坑开挖对桥梁桩基础的影响,在桥墩和基坑之间施工1道横向宽度为7.2 m、桩长为

25 m的钻孔灌注桩(直径1.0 m,桩间距1.2 m)作为隔离桩,见图1~2。

根据勘察报告,场地开挖影响范围内土层的主要物理力学参数见表1。

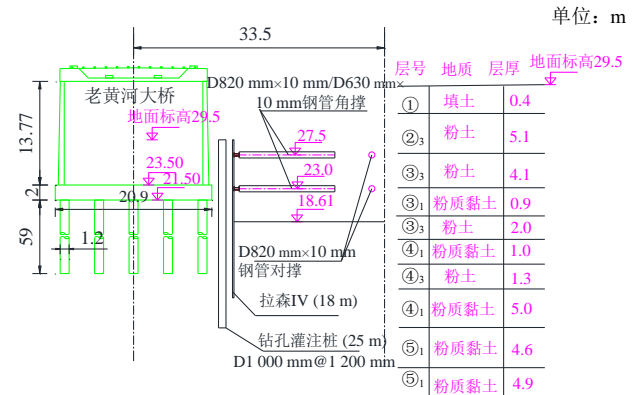


图1 基坑和土层分布示意图

Fig. 1 Profile of excavation and soil layers

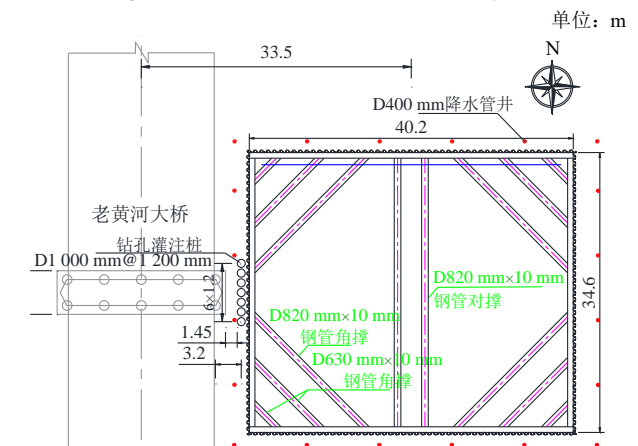


图2 基坑平面示意图

Fig. 2 Plane of excavation

表1 土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of different soil layers

土层	I_p	$\gamma/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	$c_k/$ kPa	$\varphi_k/$ ($^\circ$)	$E_{s1-2}/$ MPa
①填土	—	17.50	10.0	15.0	4.3
② ₃ 粉土	10.3	18.39	28.1	9.4	5.2
③ ₁ 粉质黏土	15.9	18.60	34.7	10.9	4.6
③ ₃ 粉土	11.6	18.38	22.8	12.0	5.1
④ ₁ 粉质黏土	12.9	19.82	32.1	11.4	5.6
④ ₃ 粉土	10.2	18.01	37.1	13.1	4.2
⑤ ₁ 粉质黏土	13.7	19.72	39.5	14.2	12.6
⑤ ₃ 粉土	9.0	19.45	15.7	14.2	6.3

注: c_k 和 φ_k 为总应力强度指标。

2 数值分析

大量工程经验表明,在正常使用阶段,岩土工

程中的土体大部分处于小应变状态^[10]。HSS 模型^[11]能够考虑土体在小应变阶段剪切模量非线性的特点, 区分加卸载模量, 同时考虑软土压硬性 与剪胀性, 因而更适用于基坑开挖的变形分析。

HSS 模型共有 13 个参数, 在 HS 模型 11 个参数的基础上增加了 2 个小应变参数 G_0^{ref} 和 $\gamma_{0.7}$, 具体参数的定义和测定方法见顾晓强等^[6]。其中 c' 和 ϕ' 分别为有效黏聚力和有效内摩擦角。 ψ 为剪胀角, 根据 BOLTON^[12] 的研究, 对砂土有 $\psi = \phi' - 30^\circ$, 当 $\phi' < 30^\circ$ 时, $\psi = 0$; 对于黏土, $\psi = 0$ 。 K_0 为初始静止侧压力系数, 可按照 $K_0 = 1 - \sin \phi'$ ^[13] 计算。 E_{oed}^{ref} 为固结试验中的参考切线模量; E_{50}^{ref} 为三轴排水剪切试验的参考割线模量; E_{ur}^{ref} 为三轴排水剪切加卸载试验的参考加卸载模量; G_0^{ref} 为参考应力下初始剪切模量; $\gamma_{0.7}$ 为割线剪切模量衰减到初始剪切模量 70% 时所对应的剪应变; m 为模量应力水平相关幂指数; R_f 为破坏比, 通常取 PLAXIS 默认值 0.9^[13]。根据 PLAXIS 用户手册, 参考应力 P^{ref} 通常取 100 kPa, 加卸载泊松比 $\nu_{ur} = 0.2$ ^[13]。

王卫东等^[5] 通过室内试验和反分析方法, 将模量参数 E_{50}^{ref} 、 E_{oed}^{ref} 、 E_{ur}^{ref} 、 G_0^{ref} 与压缩模量 E_{s1-2} 建立经验关系, 初步获取了上海典型土层 HSS 模型参数。顾晓强等^[6] 基于大量室内和现场试验数据建立了上海土体整套 HSS 模型参数与土体初始孔隙比等物理指标的经验关系。

2.1 济南地区 HSS 模型参数取值方法

李连祥等^[14] 提出济南黏性土 HSS 模量参数可取 $E_{s1-2} : E_{50}^{ref} : E_{oed}^{ref} : E_{ur}^{ref} : G_0^{ref} = 1 : 1 : 1 : 8 : 12$ 。刘嘉典^[15] 在此基础上, 对济南黄河冲积地层 HSS 模量参数取值方法进行了改进, 见表 2。

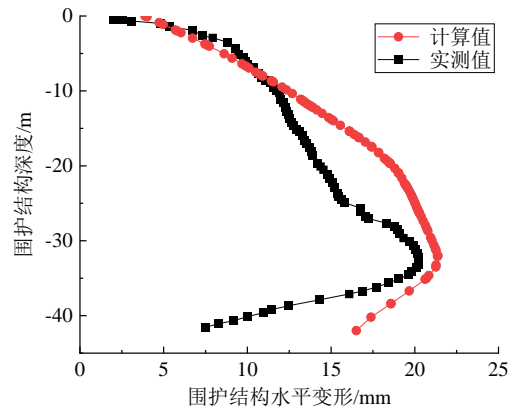
表 2 济南黄河冲积地层 HSS 模量参数取值方法
Table 2 HSS parameters of alluvial strata in Jinan Yellow River

以 E_{s1-2} 为基础, $E_{s1-2} : E_{50}^{ref} : E_{oed}^{ref} : E_{ur}^{ref} : G_0^{ref}$ 参数比例
填土与较浅黏性土 1 : 1 : 1 : 7.5 : 11.25
粉土 1 : 1 : 1 : 7 : 9.1
埋置较深黏性土 1 : 1 : 1 : 7 : 10.5

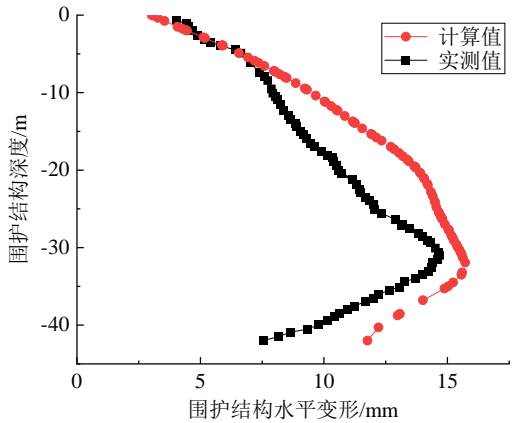
注: “埋置较深”指济南黄河冲积地层⑩层后的土层。

本文首先选取与黄河大桥相近的 2 个基坑工程 (济泺路隧道南岸工作井^[16] 和济泺路某地铁站^[17]), 在 PLAXIS 3D 中采用表 2 方法确定参数并进行变形计算分析, 基坑变形的计算值与实测值见图 3。由图 3 可知, 隧道南岸工作井长边中部实测变形最大值为 20.3 mm, 计算值为 21.4 mm; 短边中部实测变形最大值为 14.6 mm, 计算值为

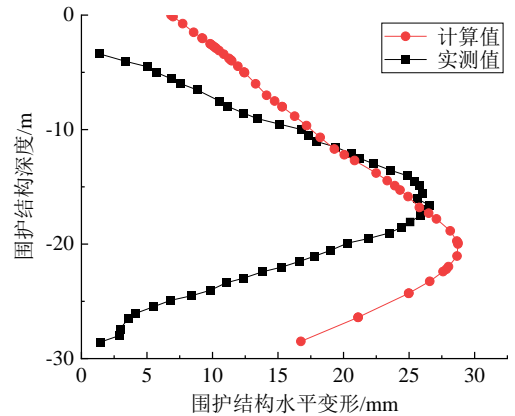
15.7 mm。济泺路某地铁站, 实测变形最大值为 26.7 mm, 计算值为 28.7 mm。以上结果表明上述 HSS 模量参数取值方法有较好的工程适用性。



(a) 济泺路隧道南岸工作井-基坑长边



(b) 济泺路隧道南岸工作井-基坑短边



(c) 济泺路某地铁站

图 3 基坑围护结构水平变形

Fig. 3 Horizontal deformation of retaining walls

2.2 黄河大桥基坑三维有限元模型建立

采用 PLAXIS 3D 建立三维有限元模型对本文桥墩基坑进行分析, 模型尺寸为 200 m×150 m×100 m。土体采用 HSS 本构模型, 具体参数见表 3。

需要指出的是, HSS 模型中 c' 和 ϕ' 均为有效强度参数, 表 1 中 c_k , ϕ_k 不可直接代入计算。本文参考了济南地区 3 个典型基坑工程案例^[14-15,18], 发现

对于②~⑤层粉土或黏性土， ϕ' 在 $25^\circ \sim 32^\circ$ 之间。由土力学理论可知， ϕ' 与土体的砂性程度相关，而塑性指数 I_p 与土体的黏性相关，二者应呈反相关的关系。将各土层按照塑性指数大小，对 ϕ' 在 $25^\circ \sim 32^\circ$ 之间线性内插，得到表 3 中的有效内摩擦角。正常固结黏土的 c' 理论上应趋近于 0，按照顾晓强等^[6] 经验公式近似计算。

砂性土、粉性土：

$$c' = -1.32(\phi' - 33) \quad (1)$$

黏性土：

$$c' = -0.76(\phi' - 38) \quad (2)$$

土体采用 10 节点四面体实体单元，拉森钢板桩和钻孔灌注桩采用板单元模拟。根据刚度等效原则^[1]，拉森钢板桩和钻孔灌注桩等效厚度分别为 0.18 m 和 0.79 m，板单元的弹性模量分别为 175.2 GPa 和 30.0 GPa。内支撑采用对点锚杆单元模拟，钢支撑弹性模量为 200 GPa，支撑尺寸和布设位置详见图 1~2。

表 3 土层 HSS 模型参数

Table 3 Parameters of HSS model for soil

土层	c' / kPa	$\phi' / (^\circ)$	$\psi / (^\circ)$	K_0	E_{s1-2} / MPa	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	$E_{50}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	$G_0^{\text{ref}} / \text{MPa}$	$\gamma_{0.7} / (\times 10^{-4})$	m	R_f
①填土	6.1	30.0	0	0.50	4.3	4.3	4.3	32.0	48.0	2	0.7	0.9
② ₃ 粉土	3.1	30.7	0.7	0.49	5.2	5.2	5.2	36.4	47.3	2	0.7	0.9
③ ₁ 粉质黏土	9.9	25.0	0	0.58	4.6	4.6	4.6	34.5	51.7	2	0.7	0.9
③ ₃ 粉土	4.8	29.4	0	0.51	5.1	5.1	5.1	35.7	46.4	2	0.7	0.9
④ ₁ 粉质黏土	7.6	28.0	0	0.53	5.6	5.6	5.6	42.0	63.0	2	0.7	0.9
④ ₃ 粉土	2.9	30.8	0	0.49	4.2	4.2	4.2	29.4	38.2	2	0.7	0.9
⑤ ₁ 粉质黏土	8.2	27.2	0	0.54	12.6	12.6	12.6	94.5	141.8	2	0.7	0.9

注： $\gamma_{0.7}$ 按经验^[5] 取 2×10^{-4} ； m 按照李连祥等^[14] 建议在 0.7~0.8 之间，本文取 0.7； R_f 按照 PLAXIS 默认值取 0.9。

对桥桩采用嵌入式梁单元模拟，弹性模量为 30 GPa，并根据勘察报告建议值设置桩侧摩擦阻力和端阻力，其中桩端阻力为 330 kPa，桩侧摩擦阻力见图 4。桥墩承台采用实体单元模拟，计算时，桥墩承台上部荷载按 200 kPa 考虑。整个有限元模型共划分 236 369 个单元，364 661 个节点。基坑及桥墩模型网格见图 5。

2.3 有限元工况模拟

模型计算需考虑基坑降水，在 PLAXIS 中采用类组水头插值方法进行模拟，将坑内土体水位设置为开挖面以下 1 m，坑外土体水头认为不变。根据现场施工状况，共设置 8 个计算步骤以模拟施工阶段，见表 4。

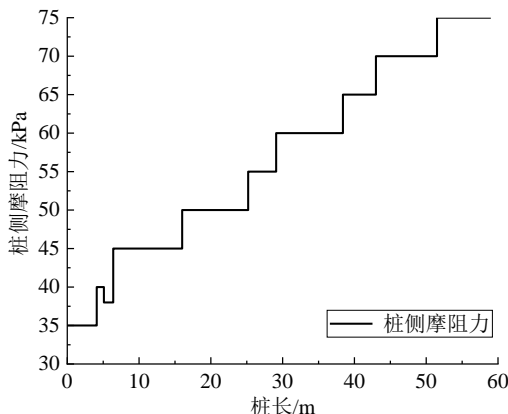


图 4 桥桩侧摩擦阻力

Fig. 4 Skin friction resistance of bridge piles

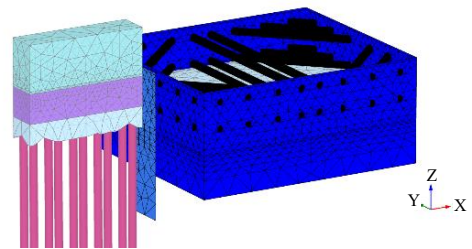


图 5 基坑及桥墩模型网格

Fig. 5 Mesh of the excavation and piles

表 4 有限元计算步骤

Table 4 Stage of FEM analysis

计算步骤	工况
1	计算初始地应力场
2	激活桥桩和桥墩
3	激活围护结构和隔离桩
4	开挖至地表以下 2.5 m
5	激活首道支撑
6	开挖至地表以下 7 m
7	激活第二道支撑
8	开挖至坑底

3 计算结果分析

如无特殊说明，以下变形为基坑开挖至坑底结果，基坑变形指基坑西侧靠近既有桥墩的围护结构

变形。

3.1 围护结构变形

图 6 给出了西侧围护结构的水平变形。西侧围护结构最大变形为 37.4 mm, 由于基坑西侧中部存在桥墩和隔离桩, 最大变形处距离基坑中线约 11.2 m。图 7 给出了土体的水平变形情况, 可见桥墩、桥桩及隔离桩对(西侧)土体起到了较强的“加筋”作用。

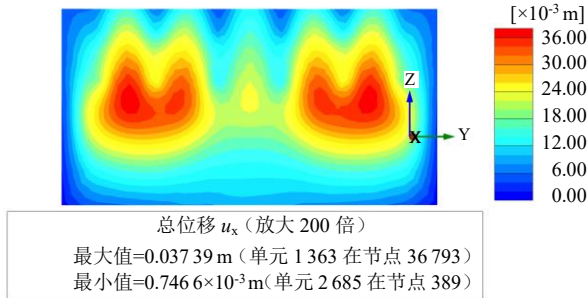


图 6 西侧围护结构水平变形

Fig. 6 Horizontal displacement of retaining structure (west side)

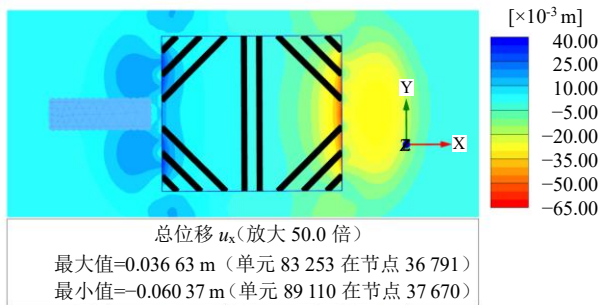


图 7 土体的水平变形

Fig. 7 Horizontal deformation of the soils

3.2 桥桩变形

图 8 为距基坑最近的桥桩水平变形结果。桥桩顶部产生了 5.60 mm 的水平变形, 最大水平变形在 -12.0 m 位置, 为 7.62 mm。桩底部受到嵌固作用明显, 变形仅为 0.41 mm。变形曲线在深度 -24~-8 m 呈抛物线形, 在深度 -67~-24 m 近似呈直线形。

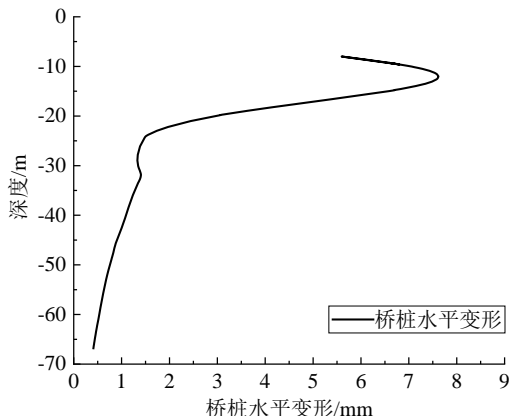


图 8 桥桩水平变形

Fig. 8 Horizontal deformation of bridge piles

4 支撑预应力影响分析

本文主要关注基坑西侧桥桩的变形, 因而对基坑角撑施加预应力, 以分析预应力对基坑和桥桩变形的影响。具体为在有限元计算步骤 5 和 7 中对支撑单元进行预应力设置, 不同预应力情况下的变形结果见表 5。由表 5 可知, 随着预应力增大, 基坑最大变形逐渐减小, 但基坑顶部会出现反向变形, 而桥桩水平变形先增大后减小, 最大变形位置逐渐下移。0~750 kN 预应力对桥桩变形控制不利, 1000 kN 预应力使得桥桩变形减小约 0.3 mm, 可见总体上角撑设置预应力对桥桩变形影响不大。

表 5 不同预应力下基坑和桥桩变形结果

Table 5 Deformation results of foundation pit and bridge piles under different prestress

预应 力/kN	基坑最大 变形/mm	基坑顶部 变形/mm	桥桩最大水 平变形/mm	桥桩最大 变形位置/m
0	37.4	0.8	7.62	-12.0
250	36.7	0.9	8.29	-12.4
500	35.1	-1.9	8.07	-12.5
750	33.8	-5.5	7.84	-12.6
1 000	32.2	-9.5	7.35	-12.8

注: 负号表示基坑变形朝向坑外。

5 隔离桩影响分析

为评估隔离桩对基坑和桥桩变形的控制效果, 按照郑刚等^[8] 建议, 定义隔离桩控制效率 η 为:

$$\eta = \frac{S_{ref} - S_{sp}}{S_{ref}} \quad (3)$$

式中: S_{ref} 为无隔离桩情况下, 基坑或桥桩最大水平变形; S_{sp} 为有隔离桩时基坑或桥桩最大水平变形。当 $\eta=0$ 时, 隔离桩控制基坑、桥桩变形无效果; 当 $0 < \eta < 1$ 时, 隔离桩对变形有阻隔效果; 当 $\eta < 0$ 时, 隔离桩的设置反而增大了变形。下文将讨论隔离桩对基坑西侧最大变形和桥桩最大水平变形的控制效率 η_{H1} 和 η_{H2} 。

5.1 隔离桩宽度

以宽度 $B_0=7.2$ m 为基础, 调整隔离桩宽度从 $0.5B_0$ 至 $2.5B_0$, 研究对 η_{H1} 和 η_{H2} 的影响, 计算结果见图 9。图中虚线表示无隔离桩时的计算结果, 基坑变形为 38.7 mm, 桥桩变形为 8.10 mm。由图 9 可知, η_{H1} 随着隔离桩宽度增加而增大, 且为正值, 即

隔离桩对基坑变形有阻隔作用。对于桥桩变形而言,当 B/B_0 在 1.5~2.25 情况下, η_{H2} 为负值,设置隔离桩反而增大了桥桩水平变形(相较于未设置隔离桩),此不利影响为隔离桩对桥桩的牵引作用,基坑设计时应尽量避免。

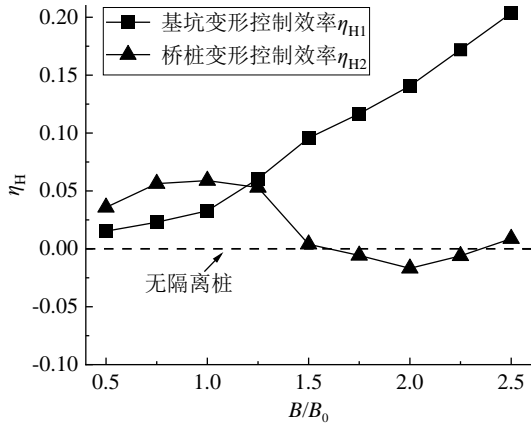


图9 隔离桩水平控制效率与宽度的关系

Fig. 9 Relationships between η_H and width of isolation piles

5.2 隔离桩长度

以隔离桩长 $L_0=25$ m 为基础,调整桩长从 $0.6L_0$ 至 $1.4L_0$,研究对 η_{H1} 和 η_{H2} 的影响,计算结果见图 10。随着隔离桩桩长增加,基坑变形呈减小趋势,但是在桩长 <18 m 时, η_{H1} 为负值。桥桩变形控制效率 η_{H2} 随隔离桩桩长呈折线分布,增加隔离桩桩长未必能减小桥桩变形。对基坑和桥桩变形控制效果均较好的点位于 $L/L_0=1.0$ 和 1.16 处,尽管 $L/L_0=1.16$ 时 η_{H1} 更大,但实际工程中需考虑增加桩长所带来的施工难度和工程成本的增大。

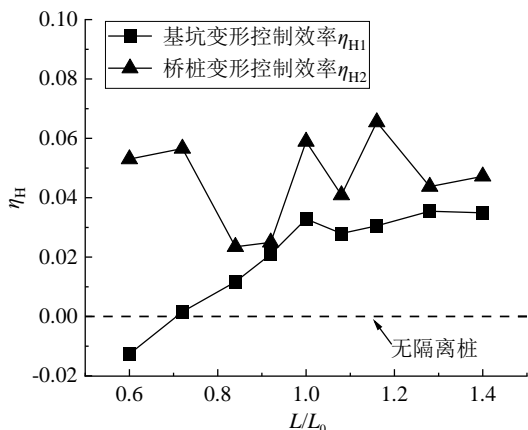


图10 隔离桩水平控制效率与桩长关系

Fig. 10 Relationships between η_H and the length of isolation piles

综合 5.1 节和 5.2 节分析结果,以 $\eta \geq 0$ 为原则(包括 η_{H1} 和 η_{H2}),考虑隔离桩对基坑和桥桩变形的控制效果,隔离桩的最优选择为 $B=7.2$ m, $L=25$ m,此时基坑变形控制效率 $\eta_{H1}=3.3\%$,桥桩水平

变形控制效率 $\eta_{H2}=5.9\%$ 。

6 结论

在已有的 HSS 模型取值方法基础上,针对济南黄河冲积地层某桥墩基坑进行三维有限元建模分析,得出以下结论:

(1) 对土体采用 HSS 模型以及合理的参数取值能够有效模拟基坑开挖引起的变形。

(2) 角撑设置预应力对桥桩变形影响不大,1 000 kN 预应力仅减小桥桩变形 0.3 mm,但会造成基坑顶部 9.5 mm 反向变形的不利影响。

(3) 隔离桩的布设对邻近桥桩变形同时存在阻隔和牵引作用,设计时应尽量避免牵引作用的不利影响。考虑对基坑和桥桩变形的控制效果,隔离桩的最优选择为宽度 7.2 m,桩长 25 m。

参考文献

- [1] 刘国彬,王卫东. 基坑工程手册[M]. 第二版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation Engineering Handbook[M]. Second Edition. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [2] POULOS H G, CHEN L T. Pile response due to excavation-induced lateral soil movement[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1997, 23(2): 94-99.
- [3] 张子新, 李佳宇, 周湘, 等. 近距离开挖卸荷条件下运营地铁高架桥墩响应研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(12): 3531-3540.
ZHANG Zi-xin, LI Jia-yu, ZHOU Xiang, et al. A study on the response of the piers of operating metro viaducts under the excavation-induced unloading condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(12): 3531-3540.
- [4] 王恒, 陈福全, 林海. 基坑开挖对邻近桥梁桩基的影响与加固分析[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(5): 1257-1265.
WANG Heng, CHEN Fu-quan, LIN Hai. Behaviors and strengthening of bridge piles subjected to excavation-induced soil movement[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(5): 1257-1265.
- [5] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 上海地区基坑开挖数值分析中土体 HS-Small 模型参数的研究[J]. 岩土力学, 2013,

- 34(6): 1766-1774.
- WANG Wei-dong, WANG Hao-ran, XU Zhong-hua. Study of parameters of HS-Small model used in numerical analysis of excavations in Shanghai area[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(6): 1766-1774.
- [6] 顾晓强, 吴瑞拓, 梁发云, 等. 上海土体小应变硬化模型整套参数取值方法及工程验证[J]. *岩土力学*, 2021, 42(3): 833-845.
- GU Xiao-qiang, WU Rui-tuo, LIANG Fa-yun, et al. On HSS model parameters for Shanghai soils with engineering verification[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(3): 833-845.
- [7] 应宏伟, 李涛, 杨永文, 等. 深基坑隔断墙保护邻近建筑物的效果与工程应用分析[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(7): 1123-1128.
- YING Hong-wei, LI Tao, YANG Yong-wen, et al. Effect and application of partition walls in protecting adjacent buildings from deep foundation pits[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(7): 1123-1128.
- [8] 郑刚, 杜一鸣, 刁钰. 隔离桩对基坑外既有隧道变形控制的优化分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(增刊1): 3499-3509.
- ZHENG Gang, DU Yi-ming, DIAO Yu. Optimization analysis of efficiency of isolation piles in controlling the deformation of existing tunnels adjacent to deep excavation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(S1): 3499-3509.
- [9] 李忠超, 宋旭, 刘源, 等. 基于隔离桩的基坑开挖邻近隧道变形控制研究[J]. *施工技术(中英文)*, 2021, 50(17): 126-129.
- LI Zhong-chao, SONG Xu, LIU Yuan, et al. Deformation control analysis of isolation piles on adjacent existing tunnel[J]. *Construction Technology*, 2021, 50(17): 126-129.
- [10] BURLAND J B. Ninth laurits bjerrum memorial lecture: "small is beautiful"-the stiffness of soils at small strains[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1989, 26(4): 499-516.
- [11] BENZ T. Small strain stiffness of soils and its numerical consequences[D]. Stuttgart: University of Stuttgart, 2006.
- [12] BOLTON M D. The strength and dilatancy of sands[J]. *Géotechnique*, 1986, 36(1): 65-78.
- [13] BRINKGREVE R, VERMEER P A. PLAXIS 3D Reference Manual Connect Edition V20[M]. Delft, The Netherlands: PLAXIS Company, 2019.
- [14] 李连祥, 刘嘉典, 李克金, 等. 济南典型地层HSS参数选取及适用性研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(10): 4021-4029.
- LI Lian-xiang, LIU Jia-dian, LI Ke-jin, et al. Study of parameters selection and applicability of HSS model in typical stratum of Jinan[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(10): 4021-4029.
- [15] 刘嘉典. 深基坑整体设计法与济南典型地层小应变参数取值研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- LIU Jia-dian. Study on the integral design method of deep excavation and small strain parameters of typical strata in Jinan[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [16] 李因旭. 粉质黏土层明挖深基坑围护结构变形规律及影响因素研究[D]. 山东青岛: 山东科技大学, 2020.
- LI Yin-xu. Study on deformation law and influencing factors of deep foundation pit support structure in silty clay layer[D]. Qingdao, Shandong: Shandong University of Science and Technology, 2020.
- [17] 马鹏程. 明挖地铁车站深基坑变形监测及控制技术研究[D]. 山东青岛: 山东科技大学, 2020.
- MA Peng-cheng. Research on deformation monitoring and control technology for deep foundation pit of open cut metro station[D]. Qingdao, Shandong: Shandong University of Science and Technology, 2020.
- [18] 邢宏侠. 深基坑“岩土结构化”永久支护体系研究与实践[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- XING Hong-xia. Study and practice on permanent supporting structure for deep foundation pit using structural method of geotechnique[D]. Jinan: Shandong University, 2021.